

微焦点 X 射线计算机层析(CMT) 及其在石油研究领域的应用

李玉彬 李向良 张奎祥 曹绪龙

(胜利石油管理局地质科学研究院, 山东东营, 257015)

摘要: 工业微焦点 CT 的 X 射线源焦点尺寸小于 5 微米, 成象分辨率明显优于常规焦点 CT。在石油勘探开发研究中, 微焦点 CT 在许多技术领域进行了应用, 取得了崭新的成果: (1) 确定岩心的基本物理参数—计算和描绘密度、孔隙度、流体饱和度分布; (2) 描述岩心的微观特征—直观描述岩石内部孔隙结构和流体分布特征; (3) 特殊油藏岩心分析评价—观察碳酸岩、火成岩等内部一些常规技术无法获得的特征; (4) 岩心驱替和提高采收率分析—重建油水在岩心内部的宏观分布状态; (5) 其他方面的应用—岩心筛选、地层伤害评价、岩石力学评价等。

关键词: 微焦点 X 射线 CT 石油

X-Ray Computed Micro-tomography(CMT) and Its Application to Petroleum Research

Li Yubin Li Xiangliang Zhang Kuixiang Cao Xulong

(Geological Scientific Research Institute of Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying, Shangdong, 257015)

ABSTRACT: The image resolution of industrial X-ray computed microtomography(CMT) with focal spot of X-ray source less than 5 micrometer is quite better than that of conventional focal spot CT. In petroleum exploration and development research, computed microtomography was used to many technological areas with revolutionary achievements: (1) determination of the basic petrophysical properties of cores—calculating and illustrating distribution of buck density, porosity and fluid saturation; (2) imaging of microscopic porous of rock— intuitive describing micro-structure of porous and oil-water distribution in porous; (3) evaluation of special lithological reservoir cores— investigating characteristics of cabonatite, mogatic rock, etc. , that can not be done by conventional methods; (4) analysis of core flooding and enhanced oil recovery— reconstructing macroscopical distribution of oil and water in cores; (5) application of other aspects: screening core, evaluation of formation damage, evaluating rock mechanical properties of cores, and so on.

Key Words: microfocuss X-ray CT petroleum

1 CT 技术在石油领域应用的简介

自从 Hounsfield 工程师开发了第一台 X 射线 CT 系统以来,随着计算机工业的飞速发展,CT 机性能不断提高,石油工程师应用医用 CT 研究岩石结构和流体分布也不断深入。CT 渗透到石油研究中的各个领域,CT 在岩石基本物理性质、特殊岩心性质、岩心地质特征描述、岩心驱替和提高采收率研究等众多方面起到了重要作用。

1979 年, Bellaire 研究中心的 Vinegar 利用医用 CT 完成第一个岩心扫描结果。随后近二十年来,在石油领域应用 CT 的研究工作涉及到岩石物理的各个方面,特别在岩心动态驱替特征方面的研究相当细致和深入。如 Wang 等(1984)描述了岩心驱替中使用 CT 扫描观测原油驱替^[4]; Wellington 和 Vinegar(1985)利用 CT 研究泡沫作为 CO₂ 流度控制剂的益处^[5]。Withjack(1988)通过 CT 确定岩心性质,指导混相驱替试验,同时描述和测量相对渗透率^[6]。Garg 等(1996)利用 CT 扫描和神经网络技术描述水驱残余油的分布^[2]。

由于医用 CT 的 X 射线源能量和系统空间分辨率较低,CT 在研究一直处于一种宏观描述的水平,也限制了岩心地质特征描述领域的发展。随着近年来高分辨率微焦点 X 射线 CT 技术的进步,研究成果的水平明显提高。如 Jasti 等(1993)介绍了微焦点 X 射线 CT 系统对孔隙结构和孔隙中的流体进行成像^[3]。Coles 等(1998)利用同步加速器微焦点 X 射线 CT 研究流体在孔隙中的运移^[1]。

1997 年底,胜利油田地质科学研究院从美国 BIR 公司引进了带有微焦点 X 射线管的 ACTIS 工业 CT 系统,该系统为岩心分析研制,我们重点在岩心微观成像和微观驱替方面进行了探索性研究,完成图象的分辨率达到了国外同期水平。本文介绍 ACTIS 微焦点工业 CT 系统,以及在石油研究领域的应用的实例,包括常规焦点 CT 能够完成的研究,也介绍常规 CT 无法完成的岩心地质特征和微观驱替特征描述。

2 ACTIS CT 系统介绍

BIR ACTIS 工业 CT 系统采用物体旋转的三代扫描方式(示意图参见文献 8),这套工业 CT 系统的特点表现在:系统配有两套 X 射线源,一个是 PANTAK 320KV 小焦点源,一个是 FeinFocus 225KV 微焦点源。FeinFocus 微焦点源的靶点尺寸可以达到微米,对特征尺寸真正实现精确测量,它对直径为 4.8mm 的物体成像,空间分辨率达到 10 μm。

系统的检测系统采用了 Toshiba 三视野图象增强器,可以实现真正的体积层析(VCT),一次扫描可以重建 100 个切片,提高了检测效率但降低了空间分辨率。

系统中有两个机械转台,立式转台用于扫描静态物体,卧式转台专门设计用于对岩心流动试验装置进行扫描。立式转台更靠近 X 射线源,有利于提高微焦点 CT 的空间分辨率系统的控制和数据采集系统采用奔腾芯片处理机,内置高速阵列处理板进行图象重建。每幅图象扫描时间大约 18 秒~5 分钟,重建时间 5 秒~1 分钟。VCT 的功能,重建 100 幅 256×256 的图象需要 6 分钟。图象像素矩阵能达到 1024×1024,显示达到 4096 阶灰度。

3 微焦点 CT 在石油研究领域的应用

利用微焦点 CT 进行岩心分析的费用较高,然而 CT 能提供岩心样品中密度、孔隙度、饱和度的分布,而常规测量方法只能给出整个岩心样品的平均值。另外,就岩石地质结构特征而言,如碳酸岩裂缝油藏岩心的孔隙结构,采用常规分析方法压汞毛管压力曲线、打磨剖光照相、铸体薄片显微照相显然存在缺陷。压汞法是建立在平行毛管束理论的基础上,它不适于裂缝和孔洞类的岩心分析;剖光照相和铸体薄片仅能观察到有限的几个剖面,无法认识岩心内部的空间分布规律;而且需要二次机械破坏,它损害了岩心固有的组织结构。

利用 CT 进行岩心分析还有以下优点: 1. 岩心驱替试验的同时进行扫描,测量带有围压条件下的参数; 2. 可以无损检测一些特殊的密闭样品; 3. 弥补常规方法无法进行分析的不足; 4. 观测孔隙度、饱和度的分布; 5. 定量检测孔隙通道或裂缝; 6. 测量不规则样品的参数。而高分辨率微焦点 CT 图象空间分辨率达到微米级,明显提高了岩心分析水平。

3.1 利用 CT 确定油层基本物理参数

岩心的基本物理参数——体积密度、孔隙度、饱和度是油田勘探和开发中最基本的物性参数,但利用 CT 进行岩心分析具有常规试验无法相比得优越性。

微焦点 CT 对岩心进行扫描后,计算密度的方法有单能扫描法、双能扫描法、线性插值法;确定孔隙度的方法有单次扫描法、两次扫描法、测井解释法、图象分析法;确定饱和度的方法有单能两次扫描确定含水率、双能扫描确定含水率、单能扫描确定两相流体饱和度、单能扫描确定三相流体饱和度、双能扫描确定三相流体饱和度、图象分析法确定流体饱和度(详细阐述参见文献 7)。

微焦点 CT 试验得到 21 块岩心的平均密度(包括 CT 插值法,CT 单能扫描干样法,CT 单能扫描饱和水样法)与煤油法测定值的平均百分绝对误差不到 1.2%。21 块岩心饱和煤油法、氦孔隙计法、CT 干样单次扫描法、CT 完全饱和水单次扫描法、CT 两次扫描法孔隙度测定值表明常规测试方法,如饱和煤油法与氦孔隙计法之间的误差为 8.53%,而 CT 两次扫描法与饱和煤油法之间的误差为 7.81%。岩心两种方法获得的相对渗透率曲线的对比,饱和度变化是一致的。CT 试验与常规测试结果的对比说明利用微焦点 CT 确定岩心的基本物理参数不仅在理论上可行,而且测试结果也相当准确。

3.2 岩石微观特征描述

储层岩石的宏观渗流特性决定于孔隙的微观结构,如孔隙的形状、大小、分布和连通性等。微焦点 CT 对孔隙和微裂缝的微观描述是其它技术无法比拟的,弥补了常规方法的许多不足。

砂岩

从微焦点 CT 图象上能直接观察到粒间孔隙的形状、大小、分布,以及颗粒的形状、大小、分布和密度,可以对砂岩岩心进行评价。高斜 73 井岩心 CT 切片,主要由 0.1~0.3mm 的颗粒组成,分选较好,同常规粒度分析结果是一致的。孔喉宽度从几微米到 200 多微米,最大孔喉远大于压汞测得的结果(72 μm),我们认为压汞平行毛管束理论假设有-一定局限性。二值化处理后,测得平均配位数 3.4,平均孔喉比 4.43,平均面孔率 27.8,最大孔隙等面积圆半径 145 μm 。

特殊岩性岩心

埕北 30 井白云质灰岩, 清楚出分辨灰质部分(暗色)和白云岩晶体部分(亮色), 晶体棱角清晰可辨。灰质和晶体之间裂缝宽度约 0.01mm, 晶间孔隙宽度为 0.05~0.3mm。单 10-斜检 1 井疏松砂砾岩, 颗粒分选差, 砾石大小均匀, 一般在 2mm~4mm, 大颗粒之间充填物细, 含油孔隙直径小, 存在 0.02~0.1mm 的裂缝, 大颗粒内也存在微细裂缝。图 1 为王平 1 井岩心 CT 图象, 左边为 2.5cm 岩心的 CT 图象, 而右边上、下两图分别取岩心不同部位的微观图象。右上图为层理部分, 微裂缝 0.01~0.02mm; 右下图为孔洞区域, 孔隙直径 0.01~0.4mm, 颗粒直径 0.02~0.8mm。

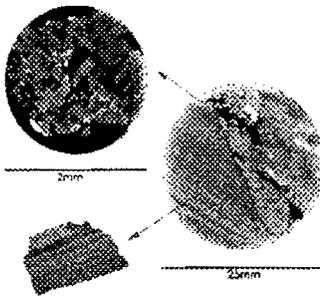


图1 WP1井岩心微焦点CT扫描切片

3.3 微观油水分布和运移

图2(左)为粒径 0.5~1mm 洗净油砂充填模型残余油状态下的 CT 扫描切片。图象重建域约 5mm, 黑色的是油, 暗色的是颗粒, 白色的是水。测得切片的面孔率为 33.7%, 此时含油饱和度为 14.8%。水呈连续相, 孤立的油滴在孔隙中间分布, 表明岩心润湿性亲水。

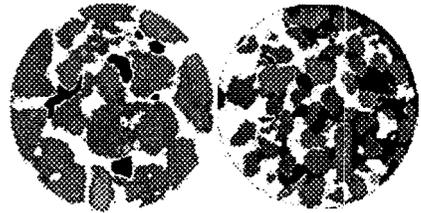


图2 微观油水残余油分布CT切片

图 2(右)为 0.2mm 油砂充填模型残余油状态下的微观 CT 切片, 重建域 2.5mm, 面孔率为 37.6%, 经过 3 小时 0.001~0.005ml/min 3% KI 溶液驱替后残余油饱和度为 30.7%。残余油大部分为连续相, 同左图中颗粒大的试验相比, 残余油饱和度明显高。

3.4 岩心地质特征描述

岩性是油藏描述的重要组成部分, 微焦点 CT 确定岩石类型、层序、层理、孔隙类型、沉积结构、岩性非均质性、渗透率变化等具有突出的优势, 能清晰反映的是岩心三维空间结构的变化。医用 CT 也能完成这些工作, 但只能对某些特征进行近似。以下 CT 岩心分析实例是常规方法难以完成的, 绝大多数也是常规焦点 CT 无法获得的。

3.4.1 均质砂岩

某些用肉眼观察岩心表面十分均匀, 没有任何差别, 然而 CT 扫描切片图象却不同, 可以看到颗粒密度不同, 以及密度和孔隙度的分布。表 3 是依据图象对岩心的分析结果:

表 3 四种不同类型砂岩 CT 扫描成像分析结果

井号	样品号	渗透率 $10^{-3} \mu\text{m}^2$	煤油法 孔隙度	CT 密度	CT 孔隙度	胶结类型	颗粒 分选性	颗粒 磨圆度	最大 颗粒	最大 孔隙
3-4-J111	255		31.5	1.88	29.5	接触胶结	好	好	0.25	0.15
孤北 341	44	52.6	15.3	2.29	16.4	孔隙胶结	中	中	0.35	0.25
河 130	33	6.0	6.0	2.59	5.1	基质胶结			0.20	0.10
坨 76	9		16.7	2.07	17.1	孔隙胶结	差	较好	0.90	0.50

3.4.2 特殊类型岩心性质

裂缝和微裂缝分布

描述裂缝非常困难, 有人曾经采用几十个参数描述裂缝, 近年来随着分形几何技术的发展使得

描述裂缝变得相对有可能。但是无论数学模型如何先进, 都必须建立在物理模型的基础上。常规方法仅能描述裂缝在一个或几个平面的分布, 而无法构造裂缝在立体空间内的展布。图 3 是滨 675 井岩心 CT 图象重建的三维裂缝和孔洞的分布, 能直观获得裂缝的宽度、方位、体积等参数。

砂砾岩的储集性

在砂砾岩油藏中, 存在几毫米到几十厘米直径的砾石。通常的观点认为砾石是一个不含任何储集和渗流空间的实心体。通过微焦点 CT 扫描发现部分砾石存在储集和渗流空间, 显然从前的观点就存在认识上的错误。埕 913 井岩心的 CT 图象一侧为破碎的砾石, 而单从岩心外表观察无法发现这种现象。CT 结果表明整个岩心的孔隙度是 0.12, 除去砾石的基质孔隙度是 0.16, 这个概念其它任何方法无法获得的。

疏松砂岩制作筛选

疏松砂岩岩心的制作作为一项成熟技术一直在各个油田应用, 它是经过煮蜡、钻取、包裹、清洗等过程后, 进行常规岩心分析和特殊岩心分析, 其制作是否合格常被提出质疑。利用微焦点 CT 能清楚地观察到一些岩心存在密度上的不均匀, 有的还存在明显裂缝, 这些特征的存在导致严重的后果, 常规岩心分析和特殊岩心分析的不准确。利用微焦点 CT 可以快速方便的对疏松岩心进行筛选, 将合格样品用于其它分析试验。

层理判断

XY59 井岩心的微焦点 CT 图象, 所示的层理现象是在岩心表面用肉眼无法观察到的。从外表看, 该岩心致密, 表面光滑, 岩性一致, 进行岩石类型划分往往认为它不属于沉积岩。从 CT 图象上观察到具有水平层理, 并且沿层理方向产生裂缝。

压缩系数异常的解释

埕北 303 井片麻岩岩心的压缩系数明显不同于该层其它岩心。随压力升高, 压缩系数降低缓慢或没有变化; 而一般情况下压缩系数随压力升高明显降低。这种现象在一段时期内没有得到令人满意的解释。而由 CT 图象能观察到岩心内部具有高密度颗粒, 难以压缩, 它对裂缝产生支撑。

孔洞连通性

岩心孔洞是良好的储集空间, 但好的储集未必是好的渗流空间, 它还取决于这些储集空间的连通状态。微焦点 CT 观察到商 742 井火成岩岩心中的孔洞成簇分布, 中间缺少良好的渗流通道, 酸化压裂作业使这些成簇的孔洞形成渗流通道, 取得良好效果的机理即在于此。

岩心污染

钻井过程会造成岩心污染, 被污染后的岩心也会造成孔隙度、渗透率和饱和度等分析数据的不准确。防止这种分析数据的不准确, 比较有效的方法就是利用 CT 筛选岩心, 选用未被污染的部分进行取样分析, 确保分析数据的准确可靠。微焦点 CT 图象观察到丰 128 井岩心越靠近岩心外表污染越严重, 取样时我们应该尽量避开污染过的外表层。

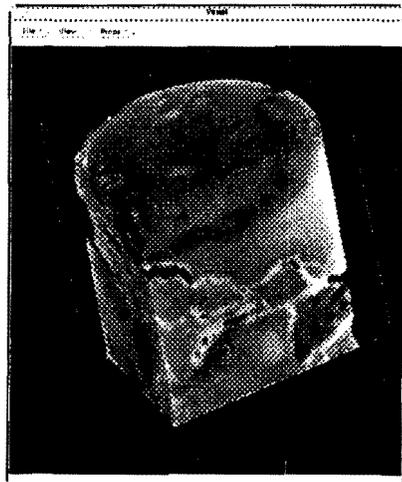


图3 滨675井岩心重建三维裂缝和孔洞状态

3.5 油水驱替动态特征描述

这项研究在常规焦点 CT 上也能很好的完成, 在微焦点 CT 上没有明显优势。图 6 是 5cm 直径

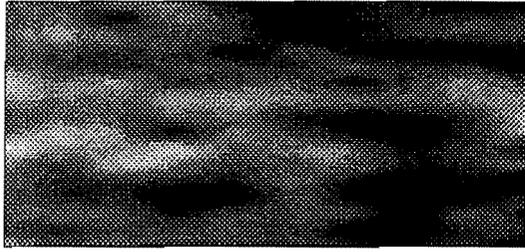


图4 岩心驱替重建油水饱和度分布剖面

砂岩岩心水驱油试验轴向剖面, 试验首先完全饱和 5%KI 溶液, 然后饱和粘度为 48mPa.s 的机油建立束缚水状态, 然后以 10ml/min 的速度泵入 KI 溶液进行驱替。在岩心完全饱和油和完全饱和水时, 分别在对应的位置扫描 9 个切片, 在动态驱替过程中在对应位置连续扫描。图 6 是驱替到残余油饱和度时油水饱和度大小分布

的轴向重建剖面, 由完全饱和水、完全饱和油、残余油状态下对应 9 个位置的 27 个扫描切片的像素矩阵 512×512 变换成 36×36 , 利用单能扫描确定两相流体饱和度的方法计算出剖面上饱和的值。

图象反映了水高速冲刷下残余油饱和度分布特征, 水明显沿水流通道窜进。

4 结束语

在石油科研领域, 应用微焦点 CT 成功地对岩心进行了扫描, 直观地描述岩石特性, 如孔隙度分布、密度变化、裂缝、孔洞、层理、岩心伤害等, 能准确计算岩心的基本物理参数——体积密度、孔隙度、饱和度; 并且成功地对特殊油藏岩心进行了综合描述分析, 将精细油藏描述推向更高的层次。

利用小块样品进行微观成像, 真实反映了孔隙介质的微观结构, 它能对油田地质特征更准确地进行了定量描述, 对孔隙和微裂缝的描述是其它技术无法完成的。完成了对油水微观驱替实验的扫描, 图象结果真实反映孔隙介质的网络结构特征, 再现了真实润湿状态下的油水运动规律和驱替特征。这项技术对进行岩石微观描述、可采储量核算、驱油机理研究等方面意义重大, 并且蕴藏着巨大的发展潜力, 尤其是在油田发展后期微观剩余油分布和提高采收率方面的研究。

同时微焦点 CT 已成功应用于岩石力学、特殊样品密度分析、精密元件无损检测、生物医学等许多方面, 尽管包括岩心分析在内许多研究是初步的, 但是相信微焦点 CT 在微观世界的探索是没有止境的。

参 考 文 献

- [1] E. Coles, R. D. Hazlett, P. Spanne, W. E. Soll, E. L. Muegge, K. W. Jones. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography: JPSE, 19(1998), 53~63
- [2] A. Garg, A. R. Kovscek, M. Nikraves, L. M. Castanier, T. W. Patzek, CT scan and neural network technology for construction of detailed distribution of residual oil saturation during waterflooding: SPE Western regional meeting, Anchorage Alaska, 1996, p695-710, SPE35737
- [3] J. K. Jasti, Gerald Jeslon, Lee feldkamp. Microscopic imaging of porous media with X-ray computer tomography: SPEFE, 1993, 189~193, SPE20495
- [4] S. Y. Wang, Seyda Ayril, F. S. Castelana, and Carl C. Gryte, 1984, Reconstruction of oil saturation distribution histories during immiscible liquid-liquid displacement by computer-assisted tomography: AIChE 30(4): 642-646
- [5] S. L. Wellington, H. J. Vinegar, 1987, X-ray computerized tomography: JPT, 1987, 885-898, SPE16983
- [6] E. M. Withjack, Computed tomography studies of 3-D miscible displacement behavior in a laboratory five-spot model: 63rd annual technical conference and exhibition of the society of petroleum engineers, Houston, 1988, 435-447, SPE18096
- [7] 李玉彬等. 利用计算机层析(CT)确定岩心的基本物理参数. 石油勘探与开发, 26(6): 1992, 12, 92-96
- [8] 李玉彬等. 微焦点 X 射线计算机层析(CT)及其在无损检测中的应用. 无损检测, 21(12): 1999, 549-552